

Литература

1. Arabey, A. The automated system for the foundry process control / A. Arabey, P. Lushchik, I. Rafalski, // International doctoral L seminar. Proc. Trnava: AlumniPress, 2007. – P.P. 7–13.

2. Киселев, С. В. Универсальное устройство для термоанализа сплавов / С. В. Киселев, Г. В. Довнар // Литейное производство. – 2004. – №3. – С. 27.

3. Бялик, О. М. Определение качества металла термическим анализом / О. М. Бялик, А. А. Смольский, Д. В. Иванчук // Литейное производство. – 1981. – №5. – С. 2–3.

4. Компьютерный анализ фазовых переходов и интервала кристаллизации заэвтектических силуминов с учетом влияния температурной обработки расплава / И. В. Рафальский [и др.] // Металлургия: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. № 31. – С. 169–179.

5. Перепелкин, С. С. Измерение температуры ликвидуса с использованием Вейвлет-преобразования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. С. Перепелкин. – СПб.: Госуд. электротехнич. универ-т ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2006. – 16 с.

УДК 621.74

И.В. ЗЕМСКОВ, канд. тех. наук,
И.К. ФИЛАНОВИЧ (БНТУ),

Г.П. ГОРЕЦКИЙ, канд. техн. наук (ФТИ НАН Беларуси)

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЖАРОСТОЙКОЙ СТАЛИ ДЛЯ ПОДДОНОВ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

В настоящее время для термической обработки деталей в нагревательных печах используют поддоны и другую оснастку из жаростойкой стали 35X18H24C2Л (ГОСТ 977–88), а также из жаростойкой стали 35X18H11CЛ (ТУ 23.118.294–88). В частности, на РУП «МТЗ» для собственного потребления используют литые поддоны из стали с 24% никеля, жаростойкость ее обусловлена высоким содержанием в ней никеля и хрома. В то же время при длительной эксплуатации эта сталь охрупчивается,

что приводит к выходу оснастки из строя из-за образования трещин. Стойкость оснастки при этом не превышает 3,0-3,5 месяцев.

В исходном литом состоянии жаростойкие стали имеют однофазную аустенитную структуру с небольшим выделением карбидов хрома и имеют высокие пластические свойства. В процессе длительной эксплуатации при температуре 500 – 1000 °С из γ -твердого раствора в большом количестве выделяются карбиды хрома и твердая хрупкая α -фаза (Fe-Cr), резко снижаются пластические свойства, сталь охрупчивается. Детали (поддоны) из-за термических напряжений в процессе «нагрев–охлаждение», растрескиваются и выходят из строя.

Кроме того, анализ существующих диаграмм состояния системы Fe –Cr –Ni –C показывает, что концентрация никеля этих сталей неоправданно завышена, что следует из видоизмененной диаграммы Маулера, и содержание его можно снизить без потери эксплуатационной стойкости.

Для этого необходимо оптимизировать химический состав стали, а главное предусмотреть промежуточную термическую обработку, чтобы повысить пластичность стали.

Температуру закалки можно приблизительно определить из псевдобинарных диаграмм системы Fe –Cr –Ni –C.

Для решения этой задачи необходимо выбрать серию сплавов различного химического состава и исследовать кинетику структурных превращений, с тем чтобы определить их химический состав с меньшим выделением охрупчивающих фаз, а также разработать режимы промежуточной термической обработки, способной увеличить пластичность жаростойких сталей и, соответственно, их эксплуатационную стойкость.

При выборе химического состава экспериментальных сплавов исходили из следующих соображений. Оснастка (поддоны) термических печей в первую очередь должна быть жаростойкой, в определенной степени малонагруженной жаропрочной, а также обладать высокой термостойкостью. На основании этого выбрали три серии аустенитных сплавов с содержанием 11, 15 и 24 % Ni и 18% Cr при варьировании содержания углерода в пределах 0,25-0,45%. Кроме того, в некоторые исследуемые сплавы вводили титан и ванадий. Содержание хрома составляло 18%. Этого количества хрома.

если учесть, что в жаростойкие аустенитные стали вводятся до 2% кремния, весьма достаточно для создания жаростойкости до температуры 1000°C. Наряду с этим, в никельсодержащих сталях хром до 18% является аустенизатором, а при большем содержании – ферритизатором. Поэтому следует ограничить содержание хрома в данных экспериментальных сталях именно на уровне 18%. Содержание никеля на уровне 11 и 24% определяется тем, что такое количество вводится в стали в соответствии с ГОСТ 977-88 и ТУ 23.118.294-88, а 15%, на наш взгляд, обеспечит требуемые эксплуатационные свойства. Титан и ванадий вводятся в стали для того, чтобы частично связать углерод в высокотемпературные карбиды с благоприятным расположением их в металлической матрице. Углерод не будет участвовать в образовании карбидов хрома, которые выделяются в основном по границам зерен и ослабляют прочностные свойства сталей. Карбид (нитрид) титана вводился в опытные стали для измельчения структуры.

Для исследования структурных превращений в экспериментальных сталях во время эксплуатационных испытаний был разработан образец-фрагмент, который по конфигурации близок к конфигурации производственных поддонов термических печей. Образец представляет собой прямоугольную рамку размером 60×120 мм из квадратного профиля сечением 15×15 мм. Посередине большой стороны рамки имеется перемычка, которая делит ее на две части. В углах рамки и в местах примыкания перемычки расположено по 6 бобышек с каждой стороны. Бобышки выполнены в виде цилиндра диаметром 15 мм и высотой 25 мм.

В процессе исследований такой образец-фрагмент загружался в термическую печь в заводских условиях вместе с производственными поддонами и испытывал аналогичные тепловые нагрузки. Через каждые 15 суток эксплуатации образцы вынимались из печи, и от каждого образца отрезалась бобышка для исследования микроструктуры и механических свойств. Образцы фрагментов изготавливали методом литья в песчано-глинистые формы. Формы изготавливали по стержневому ящику из песчано-глинистой смеси. После сушки при температуре 260-300°C два стержня скреплялись струбциной и подавались под заливку. Для изготовления литых образцов использовали индукционную вакуумную печь типа ИСВ-0,004-ПИ-М1 мощностью 52 кВт (на базе Физико-технического ин-

ститута НАН Беларуси) с продолжительностью рабочего цикла 0,5 часа и рабочей температурой 1700°C. Плавку и разливку стали проводили в атмосфере аргона, в тигле из диоксида циркония, емкостью 1 кг стали. В качестве шихтовых материалов использовали: электротехническую сталь 10895 (ГОСТ 11036-75); никель НО (ГОСТ 849-97); хром металлический Х99 (ГОСТ 5905-2004); марганец электролитический, Мр1 (ГОСТ 6008-90); кремний Кр О (ГОСТ 16100-79); алюминий технической чистоты А8 (ГОСТ 11069-2001); титан губчатый ТГ-100 (ГОСТ 17746-96).

Для определения эксплуатационной стойкости жаростойких сталей исследована группа сплавов при нагреве в безмуфельных агрегатах.

Химический состав опытных сталей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав (в массовых процентах) и твердость (HRB) для поддонов безмуфельных агрегатов в исходном состоянии

№пл.	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Al	HRB
1-1	0,35%	2,5%	1,5%	18,5%	24%	–	–	84,7
2-1	0,35%	2,5%	1,5%	18,5%	24%	–	2,5%	79,3
3-1	0,35%	1,5%	1,0%	18%	11%	–	–	85,0
4-1	0,35%	2,0%	1,0%	18%	11%	–	2,5%	93,7
5-1	0,25%	2,5%	1,5%	20,5%	13,5%	–	–	86,4
6-1	0,25%	2,5%	1,5%	20,5%	13,5%	–	2,5%	104,3
7-1	0,3%	1,0%	0,5%	24%	12%	–	–	92,5
8-1	0,3%	1,0%	0,5%	24%	12%	–	2,5%	95
9-1	0,25%	2,5%	1,0%	25%	19%	–	–	85
10-1	0,25%	4,0%	1,0%	18%	12%	0,5%	0,5%	95

Режим испытаний при восстановительном режиме – полный процесс цементации при температуре 900-910°C, 12 ч с подсушиванием до 550°C, повторном нагреве под закалку до 850°C и закалкой в масло при 120°C.

Через каждые 15 суток отрезалось по одной бобышке, на которой исследовались структура, появление микротрещин и механические свойства (твердость). На этих же образцах-фрагментах

определялась также трещиностойкость (через каждые 15 суток). Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты эксплуатационных испытаний опытных жаростойких сталей

№ Пла ки	Твердость,						Наличие трещин				
	Время выдержки, сутки						Время выдержки, сутки				
	(номер эксперимента)						(номер эксперимента)				
	0'	15	30	45	60	75	15	30	45	60	75
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Термообработка – цементация											
1 –1	84,7	90,0	89,0	88,4	87,5	88,0	нет	нет	нет	нет	нет
2 –1	79,3	93,0	91,5	90,0	91,0	88,0	нет	нет	нет	нет	нет
3 –1	85,0	95,3	95,7	93,0	99,0	98,0	нет	нет	нет	нет	нет
4 –1	93,7	105,0	103,0	101,0	103,7	104,0	нет	нет	нет	трещ	трещ
5 –1	86,4	91,0	91,0	90,3	93,0	94,0	нет	нет	нет	нет	нет
6 –1	104,3	109,0	109,7	109,0	–	110,0	нет	нет	нет	трещ	трещ
7 –1	92,0	93,0	91,7	91,0	93,5	93,0	нет	нет	нет	нет	нет
8 –1	95,0	106,0	104,0	103,5	102,0	103,0	нет	нет	нет	трещ	трещ
9 –1	85,0	94,0	90,7	89,5	90,5	90,0	нет	нет	нет	нет	нет
10 –	95,0	101,0	99,3	98,0	97,7	98,0	нет	нет	нет	нет	трещ

Анализ микроструктуры этих сталей показал, что при наличии в исходном литом состоянии структуры с аустенитной основой и карбидами хрома в виде кучных колоний, она преобразуется в процессе испытаний, колонийные карбиды растворяются и выделяются по всему объему аустенита в дисперсионном виде.

Увеличение времени выдержки (испытания) до 30-60 суток незначительно изменяет структуру, что соотносится с изменением твердости. В то же время в сталях с 11% и 15% никеля после 60 суток испытания образуются трещины на микроскопическом уровне. В стали (плавка 1) они появляются даже после 45 суток.

Результаты дюрOMETрических исследований опытных жаростойких сталей, приведенные в таблице 2, показывают изменение твердости в процессе испытания (75 суток). На основании этих данных можно отметить, если и произошел процесс науглерожива-

ния, то незначительный. Результаты микроструктурного анализа показывают повышенное содержание карбидов только на поверхности деталей.

Все исследуемые стали, в том числе и с пониженным содержанием никеля, имеют удовлетворительные свойства по трещиностойкости. Низкой трещиностойкостью обладают только те жаростойкие стали, в структуре которых присутствует феррит. К ним относятся стали, в которые был введен алюминий (2,5%), чтобы создать барьер для диффузии углерода. Кроме этого, алюминий в большом количестве вводился для получения определенного количества феррита, растворение углерода в котором ограничено. Следует отметить, что теоретические предположения не оправдались, так как в сплавах с ферритом образовались трещины. Причиной тому, по всей вероятности, явилась фазовая перекристаллизация $\alpha \leftrightarrow \gamma$ во время нагрева и охлаждения.

Для эксплуатации в условиях цементации для оснастки на основе испытаний можно использовать стали, основой которых могут быть составы, указанные в таблице 2 (плавки 3-1, 5-1, 7-1 и 9-1).

При исследовании эксплуатационной стойкости опытных жаростойких сталей после двухмесячной эксплуатации образцов-фрагментов проведена их закалка по следующему режиму: температура нагрева под закалку – 1200°C; выдержка – 10 мин; охлаждение после выдержки – на воздухе.

Результаты замера твердости образцов показали, что их твердость после двухмесячной эксплуатации возросла на 8-10%, а термообработка понижает твердость до первоначального уровня. Таким образом, закалка позволяет растворить охрупчивающую фазу – карбид хрома, и тем самым увеличить срок эксплуатации.

На основе анализа результатов исследования опытных жаростойких сталей для изготовления литых поддонов термических агрегатов с восстановительной атмосферой (печи для цементации и нитроцементации), работающих в нагруженном состоянии при температуре до 1000°C в течение длительного времени, выбрана сталь аустенитного класса 40X23H17C2Л.

В условиях РУП «МТЗ» из этой стали были изготовлены поддоны № 1018Т (30шт.), которые установили в безмуфельном агрегате термического отделения МЦ-5. Эксплуатационная стойкость поддонов из разработанной стали составила 7 месяцев, т.е. в пол-

тора раза превышает стойкость поддонов из используемой заводом стали 35Х18Н24С2Л.

Таким образом, при переходе на разработанный состав стали сокращается потребность в никеле, уменьшается объем выплавки стали для поддонов, т.к. увеличивается их эксплуатационная стойкость, снижается объем выбросов в атмосферу. Суммарная экономия на одну тонну литых поддонов составляет 5,4 млн. руб.

УДК 621.771:539:519.22/25

Е.С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук,
Б.А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ),
Н.Б. КАЛЕДИНА, канд. техн. наук (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЗАКАЛЕННОМ СОСТОЯНИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Пластическая деформация служит эффективным средством воздействия на структуру и механические свойства закаленных сталей при надлежащем выборе всех компонентов технологического процесса (марки стали, режима термической обработки, степени деформации) и может обеспечить дополнительное упрочнение материала при сохранении достаточного запаса пластичности и вязкости.

К настоящему времени опубликован ряд работ, в которых отмечено, что при малых степенях пластической деформации после закалки структура и свойства стали претерпевают значительные изменения [1, 2]. В связи с этим представляет интерес исследовать процесс упрочнения закаленных сталей после пластической деформации с большими ($\epsilon > 10\%$) степенями деформации.

В данной работе для исследования были выбраны низкоуглеродистые стали 10ХСНД (0,09% С) и 18Х2Н4ВА (0,17% С). После закалки они подвергались деформированию прокаткой до 50%. Закалку стали 10ХСНД проводили от 900 °С, а стали 18Х2Н4ВА от 850 °С в воде. Перед деформацией образцы зачищали с двух проти-